

## *Tension superficielle (1/2)*

### **Introduction historique :**

On dit souvent d'un liquide qu'il adopte la forme du récipient qui le contient. Ce n'est pas tout à fait exact !

En effet, une petite quantité de liquide peut se présenter sous la forme d'une goutte : une goutte d'huile dans l'eau ou une bulle de savon forment une sphère parfaite, lisse et très peu déformable.

Ces exemples montrent que la surface d'un liquide est comme une membrane tendue, caractérisée par une tension de surface ou tension superficielle qui s'oppose à ses déformations.

Les forces capillaires mises en jeu sont impressionnantes : elles permettent d'expliquer la forme des gouttes et des bulles mais aussi la formation des mousses, la surfusion, la montée d'un liquide dans un capillaire très fin et de comprendre pourquoi les insectes marchent sur l'eau mais pas sur une mare polluée avec du détergent ...

La capillarité est l'étude des interfaces entre deux liquides non miscibles ou entre un liquide et l'air. Ces interfaces sont mobiles et capables de se déformer pour minimiser leur énergie de surface.

Léonard de Vinci mentionne déjà le phénomène de capillarité et prédit que l'existence des sources en montagne est liée à un réseau de fins capillaires capables de hisser l'eau.

Le physiologiste anglais James Jurin (né en 1684 et mort en 1750) confirme que la hauteur atteinte par un liquide dans un tube capillaire est inversement proportionnelle au rayon du tube.

Cette science a pris son essor au début du 19<sup>ème</sup> siècle, avec Pierre Simon de Laplace (né en 1749 et mort en 1827) et Thomas Young (né en 1773 et mort en 1829), qui évaluent la surpression dans les gouttes induite par la tension superficielle et qui peut être supérieure à la pression atmosphérique normale !

Pierre-Gilles de Gennes, né en 1932 à Paris et mort en 2007, physicien français et prix Nobel de physique en 1991 s'est notamment intéressé au comportement d'une goutte d'eau et a élargi le champ d'étude de la capillarité à celle de la matière molle.

La capillarité joue un rôle majeur dans de nombreuses applications scientifiques, comme dans la science des sols ou la physique des surfaces, et industrielles, comme dans l'industrie du verre, du textile ou de la cosmétique.

La tension superficielle est très importante, par exemple, dans les processus de collage. En effet, plus la tension superficielle d'un matériau est élevée et plus l'adhésion d'une substance (de la colle ou de l'encre) appliquée sur ce matériau sera bonne.

Au contraire, plus le matériau a une tension superficielle basse, plus il servira de filtre hydrophobe ou oléophobe.

Nous allons, dans cette vidéo « La Physique animée », nous intéresser à la tension superficielle à l'interface entre un liquide et l'air et établirons deux lois importantes en capillarité, la loi de Laplace et la loi de Jurin.

### Interprétation microscopique :

Les molécules d'un corps pur liquide s'attirent mutuellement grâce à l'action des forces de Van der Waals.

L'attraction entre les molécules se compense à l'intérieur du liquide.

Par contre, les molécules qui sont à la surface ne peuvent interagir qu'avec leurs voisines latérales et inférieures. Ainsi, à la surface, les forces de cohésion ne s'équilibrent pas symétriquement comme à l'intérieur du liquide.

La tension superficielle est la manifestation de cette dissymétrie.

La forme de la surface du liquide sera le résultat de l'équilibre entre la pression du gaz au dessus du liquide, l'attraction par l'intérieur du liquide et le poids.

L'énergie de cohésion par molécule d'un liquide tel que l'huile est de l'ordre de  $k_B T$ , où  $k_B$  désigne la constante de Boltzmann et T la température absolue exprimée en kelvin.

L'ordre de grandeur de l'énergie perdue par une molécule à la surface du liquide sera  $k_B T / 2$ .

Pour obtenir l'énergie par unité de surface, il suffit de la diviser par la surface de la molécule dont la dimension typique est  $a \approx 5 \cdot 10^{-10} \text{ m}$  :

$$\gamma \approx \frac{k_B T}{2a^2}$$

Ce qui donne un coefficient de l'ordre de  $10 \text{ mJ} \cdot \text{m}^{-2}$  :

$$\gamma \approx 10 \text{ mJ} \cdot \text{m}^{-2}$$

Et nous verrons, à l'aide de quelques illustrations, que cette valeur est correcte.

Une boucle de fil est attachée en deux endroits à un cadre par deux fils. On plonge l'ensemble dans de l'eau savonneuse puis on le retire. Il se forme alors une membrane liquide plane qui s'appuie sur le cadre.

Si on crève la membrane liquide dans la boucle uniquement, celle-ci se tend suivant un cercle : la boucle est soumise à des forces de tension superficielle de la part du liquide.

- Ces forces sont perpendiculaires en chaque point du contour et tendent à minimiser la surface du film d'eau savonneuse.
- Ces forces sont tangentes à l'interface eau – air et réparties de façon uniforme.

Isolons par la pensée une surface (S) située à l'interface entre un liquide et l'air. Soit un élément de longueur  $dl$  du contour (C) de la surface.

Tout se passe comme si le reste du liquide exerçait sur l'élément de longueur  $dl$  une force  $dF$  qui lui est perpendiculaire, dirigée vers l'extérieur de (S) et proportionnelle à sa longueur :

$$dF = \gamma dl$$

Ce phénomène tend la surface.

$\gamma$  est le coefficient de tension superficielle : c'est une force par unité de longueur, exprimé en  $\text{N.m}^{-1}$ .

Prenons le cas de l'eau : sa forte cohésion, due à l'existence de liaisons hydrogènes, permet d'expliquer le fait que des insectes, ou des objets légers comme des trombones peuvent être posés sur la surface de l'eau sans qu'ils coulent ou que l'on puisse verser de l'eau dans un verre, jusqu'à ce que le niveau de l'eau dépasse les bords du verre, sans pour autant qu'elle ne coule.

### Caractérisation énergétique de la tension superficielle :

Soit  $dS$  l'augmentation de l'aire S.

Le travail nécessaire pour augmenter l'aire interfaciale est le travail de la force de tension superficielle :

$$\delta W = \int F dr = \int \gamma dl dr = \gamma dS$$

Le coefficient de tension superficielle s'interprète également comme l'énergie à fournir pour augmenter la surface d'une unité.

On retrouve ici l'interprétation énergétique qualitative donnée précédemment.

### Films d'eau savonneuse :

En guise d'illustration, observons les géométries de films de savon sur des supports de différentes formes.

Lorsque l'on trempe un tétraèdre dans du liquide à bulle, on s'attend à ce que les quatre faces soient pleines. Mais on observe six plans qui partent de chacune des six arêtes et qui se rejoignent au centre de la pyramide.

Un peu de géométrie permet de comprendre cette configuration :

- Si le film était tendu sur chacune des 4 faces, l'aire totale serait  $4\left(\frac{\sqrt{3}}{4}\right)a^2 \approx 1,73a^2$ , où  $a$  est la longueur de l'arête.
- Mais on observe que le film se répartit en 6 triangles qui partent de chacune des 6 arêtes et se rejoignent au centre de la pyramide.

L'aire de cette géométrie est  $6\left(\frac{\sqrt{2}}{2}\right)\frac{a^2}{4} \approx 1,06a^2$ .

Energétiquement, la 2<sup>nde</sup> géométrie est bien préférable.

Lorsque l'on trempe un cube, on découvre un film de savon de forme étonnante ! Au centre de la structure, le film de savon prend une forme ressemblant à un cube mais dont les arêtes ne sont pas orthogonales. C'est comme si le cube était « gonflé ». Les calculs géométriques sont également possibles mais ils sont plus techniques !

On tend maintenant un film savonneux sur deux anneaux. Lorsqu'on les éloigne la surface se courbe et prend la forme d'une chaînette, c'est-à-dire la forme prise par une corde souple tenue par ses extrémités.

Ces films prennent des formes étonnantes, correspondant finalement à des surfaces minimales, permettant de minimiser leur énergie de surface.

### Quelques ordres de grandeur de $\gamma$ :

Le coefficient de tension superficielle  $\gamma$  est homogène au rapport d'une force par une longueur ( $N.m^{-1}$ ) ou au rapport d'une énergie par une surface ( $J.m^{-2}$ ).

A température ordinaire, le coefficient de tension superficielle  $\gamma$  vaut, pour les liquides, quelques dizaines de  $mJ.m^{-2}$  ou  $mN.m^{-1}$ .

Donnons quelques exemples pour des liquides au contact de l'air :

- Pour l'éthanol,  $\gamma$  vaut  $22 mN.m^{-1}$
- Pour l'eau savonneuse,  $25 mN.m^{-1}$
- Pour de l'acide acétique dilué à 10%,  $55 mN.m^{-1}$
- Pour de l'eau à  $20^\circ C$ ,  $75 mN.m^{-1}$  pour un glaçon

Le coefficient de tension superficielle dépend de la nature du liquide et de celle du gaz en contact avec lui ainsi que de la température et varie considérablement en présence d'impuretés.

Les tensioactifs sont des molécules contenant un pôle hydrophile et une longue chaîne hydrophobe. Lorsqu'un tensioactif est ajouté à de l'eau, il vient se placer immédiatement à la surface, avec le pôle hydrophobe pointant à l'extérieur de la surface.

Ce processus s'accompagne d'une stabilisation de la surface et donc d'une chute du coefficient de tension superficielle.

### **Eau pure vs eau savonneuse :**

Mettons en évidence expérimentalement la force de tension superficielle.

Prenons une boîte de Pétri remplie d'eau sur laquelle nous posons un fil de coton. Le fil n'est pas tendu. Lorsque nous faisons tomber une goutte de savon, le fil se tend du côté opposé à la goutte. Le fil est une interface entre l'eau pure et l'eau savonneuse.

En rajoutant du savon, on écrante les interactions entre les gouttes d'eau, ce qui diminue la tension de surface.

Deux interprétations : tout d'abord en terme de forces : la force tirant vers l'eau pure devient plus grande que la force tirant vers l'eau savonneuse. Mécaniquement, la résultante est vers l'eau pure et le flotteur est tiré. D'un point de vue énergétique, la surface savonneuse est plus favorable car d'énergie plus faible. Le système choisi donc de réduire la surface de l'eau pure et d'augmenter la surface d'eau savonneuse.

Dans un cristalliseur rempli d'eau, nous déposons à la surface de l'eau des grains de poivre. Le poivre est hydrophobe, il ne se dissout pas dans l'eau. Il flotte sur l'eau grâce à la force de tension superficielle de l'eau. Lorsqu'on vient faire tomber une goutte de savon au centre, on voit les grains de poivre migrer instantanément vers les bords.

C'est l'effet Marangoni. Il se crée un gradient de concentration de savon entre le centre et le bord du cristalliseur qui induit un gradient de tension de surface et par suite un déplacement d'eau.

Les molécules d'eau peuvent être imaginées comme des personnes se tenant la main.

Ceux du bord (où il n'y a pas de savon) tirent plus fort que ceux du centre (où on a mis la goutte de savon).

Ce ne sont pas les grains de poivre qui se déplacent, ils sont simplement utilisés comme des traceurs pour visualiser les mouvements de la surface de l'eau.

Voici maintenant, un petit bateau en papier flottant sur une surface d'eau pure. Nous déposons une goutte de savon près de l'encoche à l'arrière du bateau et il se met à avancer.

Cette dernière expérience nous permet d'observer un cas intermédiaire intéressant où il n'y a pas vraiment d'interfaces entre deux milieux distincts comme dans l'expérience avec le fil sur la boîte de pétri, et le bateau, du fait de sa taille ne peut pas vraiment être apparenté à un traceur, comme dans le cas du poivre.

On peut évaluer la force qui agit sur le bateau que l'on voit avancer sur la vidéo : on note  $\gamma_e$  et  $\gamma_s$  les coefficients de tension superficielle de l'eau pure et de l'eau savonneuse, avec  $\gamma_s < \gamma_e$ .

La force de propulsion s'écrit comme la différence des coefficients de tension superficielle de l'eau et de l'eau savonneuse multipliée par la largeur de l'encoche contenant l'eau savonneuse :

$$F = (\gamma_e - \gamma_s)l$$

Avec  $\gamma_e = 73 \text{ mN.m}^{-1}$  et  $\gamma_s \approx 25 \text{ mN.m}^{-1}$ , l'ordre de grandeur de cette force de propulsion est , avec  $l \approx 2 \text{ cm}$  :  $F = (\gamma_e - \gamma_s)l \approx 1 \text{ mN}$ .

---